

Best Management Practices Presentation to Deal with the Simultaneous Coastal and Inland Urban Flooding Hazards

M. Karamouz^{1*} and M. Taheri²

Abstract

Joint occurrence of coastal and inland urban flooding is considered as a major problem in coastal developed cities. An appropriate perception of flood hazard is imperative to face new challenges in flood management in these areas. To address this issue, flood frequency and intensity are determined based on historical storm data of the case study utilizing statistical analysis. Five copula functions have been fitted to hydrological data to find joint return periods of coastal and inland flooding and the best one has been detected based on the Kolmogorov-Smirnov and the root-mean-square error test. Afterward, flood delineation map is used as an effective tool in the improvement of decision making process in urban development plans. For this end, a geographic information systems based software named WMS has been utilized to delineate flood inundation and depth in Bronx brought of New York city in United States. Best management practices as flood management/mitigation strategies are categorized in five classes, namely resist, delay, store, discharge, and retreat. A performance index has then been derived based on five factors of degree of hazard mitigation, aesthetic, capital cost, maintenance and operation cost, and adaptability utilizing Multi Criteria Decision Making methods. Finally, one of the strategies is selected as a viable strategy to reduce flood hazards.

Keywords: Bronx New York City, Best Management Strategies, Multi Criteria Decision Making, Joint Occurrence Analysis of Coastal and Inland Urban Flooding, Flood Hydrological Simulation.

Received: February 14, 2018

Accepted: June 28, 2018

ارائه‌ی راه‌کارهای مدیریتی در مقابله با مخاطرات هم‌زمان سیلاب‌های ساحلی و درون شهری

محمد کارآموز^{۱*} و مهکامه طاهری^۲

چکیده

هم‌زمانی سیلاب ساحلی و درون شهری به عنوان تهدیدی برای مناطق توسعه یافته شهری ساحلی به‌شمار می‌رود. برای رویارویی با چالش‌های جدید مدیریت سیلاب در این مناطق در درجه اول باید درک مناسبی از مخاطرات ناشی از سیلاب فراهم شود. بدین منظور در این تحقیق به شناسایی شدت و فراوانی وقوع سیل بر پایه‌ی اطلاعات طوفان‌های تاریخی منطقه موردنظر با استفاده از روش‌های آماری پرداخته شده است. پنج تابع توأمان برای تعیین دوره بازگشت هم‌زمان سیلاب درون شهری و ساحلی بر داده‌های هیدرولوژیکی برازش داده شده و درنهایت با استفاده از آزمون‌های کلموگروف اسمیرنوف و خطای ریشه حداقل مربعات بهترین آن‌ها انتخاب شده است. سپس به منظور افزایش کیفیت و مدیریت برنامه‌های توسعه شهری، استفاده از نقشه‌های سیلاب به عنوان یک ابزار مفید در تصمیم‌گیری استفاده شده است. از این‌رو نرم‌افزار WMS مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS²)، در تعیین گستره و عمق آب‌گرفتگی ناشی از سیلاب ترکیبی ۱۰۰ ساله بر منطقه برانکس^۳ در شهر نیویورک به کار گرفته شده است. راهکارهای مدیریتی کنترل سیلاب (BMP^۴) به‌عنوان روش‌های کاهنده اثرات مخرب سیلاب در پنج گروه مقاومت^۵، تأخیر^۶، عقب‌نشینی^۷، ذخیره^۸ و تخلیه^۹ طبقه‌بندی شده‌اند. سپس با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره شاخص عملکرد راه‌کارها براساس پنج فاکتور درجه کاهش خطر^{۱۰}، زیبایی^{۱۱}، هزینه‌های ساخت^{۱۲}، هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری^{۱۳} و سطح سازگاری با طبیعت^{۱۴} تعیین شد و در نهایت یکی از راه‌کارها به عنوان استراتژی برتر کنترل سیلاب معرفی شده است.

کلمات کلیدی: برانکس نیویورک، بهترین راه‌کارهای مدیریتی، تصمیم‌گیری چندمعیاره، تحلیل توأمان وقوع سیلاب درون شهری و ساحلی، شبیه‌سازی هیدرولوژیکی سیلاب.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۱۱/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۴/۷

1- Professor, Department of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: karamouz21@gmail.com

2- Ph.D. Student in Environmental and Water Resource Engineering, The Department of Civil and Environmental Engineering, University of Waterloo, Ontario, Canada.

*- Corresponding Author

۱- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تهران.

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی محیط زیست و منابع آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه واترلو، اونتاریو، کانادا.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

گرفتند توسعه شهرنشینی در بعضی نقاط ۷۰-۲۰ درصد موجب افزایش شدت موج طوفانی و در نتیجه گسترش سطوح آب‌گرفته شده است. Ozhan et al. (2018) با استفاده از مدل هیدرولیکی دو بعدی LSFLOOD-FP، سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف در حوضه رودخانه چهل‌چای واقع در استان گلستان را شبیه‌سازی نمودند. همچنین آن‌ها به منظور واسنجی نتایج مدل از شاخص تطابق استفاده کردند. نتایج مدل توسعه داده شده به عنوان ابزار مفیدی در توسعه شهری و برنامه‌ریزی استراتژی‌های کنترل سیلاب قابل استفاده است. در مقابل، مدل‌های هیدرولوژیکی سیل در سه گروه مدل‌های متمرکز (Khakbaz et al., 2012)، نیمه متمرکز و توزیعی (Nguyen et al., 2016) تقسیم‌بندی می‌شوند. مدل‌های متمرکز کل سیستم را به صورت یک المان واحد با یک ورودی و یک خروجی در زمان در نظر می‌گیرند و برخلاف مدل‌های توزیعی که ناهمگنی در خصوصیات حوضه را در نظر می‌گیرند، عمل می‌کنند. اقدامات زیادی در ایجاد اتصال بین مدل‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی صورت گرفته است. به عنوان مثال Karamouz et al. (2014) یک طرح یکپارچه برای تعیین گستره‌ی آب‌گرفتگی در ناحیه ساحلی با در نظرگیری اثر هم‌زمانی سیلاب ساحلی و درون شهری (ناشی از بارش) ارائه نمودند. برای این منظور از اتصال مدل بارش رواناب¹⁶ SWMM و مدل شبیه‌ساز سیلاب ناشی از طوفان دریا HEC-RAS استفاده کردند. در آن تحقیق سناریوهای ترکیبی سیلاب تعریف نشده بودند و تنها با در نظرگیری مقادیر مشخصی برای سیلاب ساحلی و درون شهری اثر هم‌زمانی رخداد این دو واقعه بررسی شد.¹⁷ GSSHA مدل هیدرولوژیکی توزیعی دیگری است که قابلیت مدل‌سازی هم‌زمان هیدرولیکی و هیدرولوژیکی را داراست و هدف اصلی آن شبیه‌سازی درست و واقعی فرآیندهای هیدرولوژیکی درحوضه از جمله توزیع بارش، نفوذ، روندیابی دوبعدی جریان سطحی و روندیابی یک بعدی رودخانه است (Downer and Ogden, 2004). Karamouz et al. (2017) از مدل توزیعی هیدروژیکی GSSHA برای در نظرگیری هم‌زمان سیلاب ناشی از بالا آمدن سطح آب دریا و بارش در دوره بازگشت‌های مختلف در منطقه منهن شهر نیویورک در ایالات متحده آمریکا (واقع در جنوب منطقه مورد مطالعه این مقاله) استفاده نمودند. سناریوهای تعیین شده در آن تحقیق نیز بدون در نظرگیری تحلیل توأمان پدیده‌های هیدرولوژیکی تعریف شده است. از این رو در مقاله حاضر با تحلیل توأمان وقوع بارش و امواج طوفانی بر مبنای دو رویکرد عطفی و فصلی، به افزایش دقت مطالعات سیل پرداخته شده است.

استفاده از مدل‌های پهنه‌بندی سیلاب هدف‌های مختلفی را برآورد می‌سازد. یکی از موارد پرکاربرد این مدل‌ها تعیین خصوصیات

توسعه شهری، رشد جمعیت، گرمایش جهانی و افزایش سطح آب دریا موجب افزایش شدت و فرکانس وقوع سیلاب و تغییر پاسخ هیدرولوژیکی حوضه نسبت به آن شده است. به علاوه، افزایش سطح آب دریا موجب تغییرات الگوی آب‌گرفتگی سیلاب در کوتاه مدت، فرسایش ساحل و نفوذ آب شور به سفره آب‌های زیرزمینی شده است (Bilskie et al., 2014). در نتیجه در نواحی ساحلی و نقاط کم ارتفاع که در معرض آسیب بالای امواج طوفانی هستند، نیاز به انجام اقدامات خاصی وجود دارد. اولین قدم در شناسایی خطر و مناطق در معرض سیلاب، تعریف دقیق شدت سیلاب بر اساس دوره بازگشت مشخص است. به منظور تعیین شدت و فراوانی وقایع هیدرولوژیکی همچون خشکسالی و سیلاب استفاده از تحلیل‌های چند متغیره به علت در نظرگیری هم‌زمان مشخصه‌های اثرگذار بر واقعه، موجب افزایش دقت و جامعیت تحلیل می‌شود. Yosefi et al. (2017) با بررسی ارتباط بین شاخص‌های خشکسالی و پارامترهای هواشناسی با استفاده از ضریب هم‌بستگی پیرسون به ارائه چارچوبی در انتخاب شاخص خشکسالی با توجه به آب و هوای منطقه پرداختند. Rahimi et al. (2014) با توجه به نقش تعیین‌کننده‌ی دبی اوج و حجم سیلاب در طراحی سازه‌ها، با استفاده از توابع مفصل ارض‌میدسی، ساختار وابستگی بین این دو متغیر را تحلیل کردند. آن‌ها با در نظر گرفتن معیار حدی دبی اوج و روش حداکثر سالانه، سری زمانی داده‌های سیلاب را در مقیاس روزانه برای ایستگاه اراز کوسه در استان گلستان تعیین کردند. آن‌ها با در نظرگیری تفاوت مقادیر دبی اوج و حجم سیلاب در تحلیل دومتغیره و یک‌متغیره، تحلیل فراوانی یک متغیره‌ی وقایع هیدرولوژیکی را به علت در نظر نگرفتن یک سری از مشخصه‌های مؤثر در پدیده سیلاب همراه با خطا یافتند و تحلیل چندمتغیره را توصیه کردند.

نگاشت بلایای طبیعی و ریسک‌های اقلیمی جزء اصلی استراتژی‌های مدیریت اضطراری در مناطق شهری پر جمعیت است. این موضوع از دیرباز (دهه ۱۹۳۰) مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته و پیشرفت خود را مدیون رشد پویای سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) است (Patrick et al., 2015). در این میان مدل‌های عددی برای تعیین گستره‌ی آب‌گرفتگی و مطالعه‌ی امواج طوفانی به کار گرفته می‌شوند. به عنوان مثال Bilskie et al. (2014) با استفاده از مدل عددی هیدرودینامیکی چرخش پیشرفته^{۱۵} (ADCIRC) به مطالعه اندرکنش امواج طوفانی و بالا آمدگی سطح آب دریا در سیلاب ساحلی (ناشی از امواج طوفانی) پرداختند. آن‌ها اثرات تغییر کاربری اراضی را در سطوح مختلف افزایش سطح آب دریا بر امواج طوفانی بررسی کرده و نتیجه

پرسش‌نامه و استفاده از نظر متخصصین یک شاخص خطر سیلاب برای نقاط مختلف منطقه مورد مطالعه به دست آوردند. فرآیند تصمیم‌گیری در مورد کاهش اثرات سیلاب شامل فاکتورهای زیادی است. (Daksiya et al. (2017) با بهره‌گیری از سه معیار اجتماعی تمرکز جمعیت، رشد جمعیت و نرخ بیسوادی در ترکیب با معیارهای اقتصادی شامل محصول ناخالص منطقه، درصد پرداخت ماهیانه بیمه و مالیات و میزان سرمایه‌گذاری داخلی و خارجی یک شاخص اجتماعی-اقتصادی تشکیل دادند. این شاخص خود به عنوان یک معیار مستقل به همراه سه معیار تلفات قابل انتظار محاسبه شده‌ی سالانه، عدم قطعیت در بارش پیش‌بینی شده و هزینه ساخت بند ساحلی در تعیین بند مناسب از میان پنج طرح پیشنهادی به کار گرفته شدند.

با بررسی مطالعات پیشین نیاز به ارائه یک رویکرد جامع به منظور افزایش انعطاف‌پذیری و کارآمدی استراتژی‌های کنترل سیلاب مشاهده می‌شود. ازین‌رو، در این تحقیق رویکردی جامع در برگیرنده مراحل مختلف از جمله شناخت شدت مخاطره سیلاب، تعیین مناطق و زیرساخت‌های در معرض خطر، ارائه استراتژی‌های کنترل سیلاب و ارزیابی آن‌ها بر اساس روش‌های تصمیم‌گیری، پیشنهاد شده است.

۲- روش تحقیق

مطابق با فلوجارت مشخص شده در شکل ۱، ابتدا به تعیین شدت سیلاب ۱۰۰ ساله ناشی از بارش و امواج طوفانی با استفاده از توزیع‌های توأمان فراوانی سیلاب پرداخته می‌شود. سپس مدل‌سازی سیلاب در مدل توزیعی هیدرولوژیکی صورت می‌پذیرد و عمق و پهنه سیلاب ۱۰۰ ساله در منطقه مورد مطالعه تعیین می‌گردد. سپس با معرفی استراتژی‌های مختلف سازگار کنترل سیلاب شاخصی بر اساس خصوصیات آن‌ها ارائه می‌شود. در نهایت، مناسب‌ترین راه کار با استفاده از نظر متخصصین و به کارگیری روش‌های مدیریتی تصمیم‌گیری انتخاب می‌شود.

۲-۱- شناخت مخاطره سیل و شبیه‌سازی پهنه سیلاب

اولین قدم برای تعیین مخاطره سیلاب و شدت سیلاب‌های محتمل، دسترسی به اطلاعات تاریخی منطقه و تحلیل فراوانی آن‌هاست. تعیین احتمال وقوع هم‌زمان در این تحقیق با بکارگیری توابع توزیع توأمان کاپولا^{۱۹} که یک روش قدرتمند در ساده‌سازی تحلیل‌های چند متغیره بوده، صورت می‌پذیرد. توابع توأمان به منظور تعیین احتمال وقوع هم‌زمان دو پدیده بارش و امواج طوفانی، توابع توزیع تک‌متغیره هر یک از آن‌ها را با هم مرتبط می‌سازد.

عملکردی زیرساخت‌های مختلف شهری در مواقع بحرانی وقوع سیلاب است. به عنوان مثال (Karamouz et al. (2018) با استفاده از نتایج پهنه‌بندی سیلاب ساحلی ۱۰۰ ساله توسط مدل توزیعی هیدرولوژیکی GSSHA و مدل HAZUS و اطلاعات جمع‌آوری شده در مورد ۱۴ تصفیه‌خانه شهر نیویورک، تاب‌آوری آن زیرساخت را کمی نمودند. آن‌ها با ارائه رویکرد همکارانه تصفیه‌خانه‌ها و استفاده از راه کارهای مدیریتی در ترکیب با مسائل مالی و فاکتورهای اقتصادی به بازبینی مقدار تاب‌آوری تعیین شده پرداختند و بهترین روش برای بهبود عملکرد هر تصفیه‌خانه در هنگام سیلاب را اعلام کردند. فعالیت‌ها و ساختارهای کنترل سیلاب در تلاش برای کاهش اثرات مخرب ناشی از سیلاب به کار گرفته می‌شوند. پاسخ نامناسب سیستم شهری به این ساختارها گاهی می‌تواند این اثرات را شدت بخشد و فاجعه بزرگتری بیافریند (Marfai et al., 2015). روش‌های گوناگونی در بهبود آمادگی سیستم در برابر سیلاب وجود دارند و بطورکلی به دو دسته شامل روش‌های سازه‌ای (سخت) و روش‌های ترکیبی از سازه‌ای و غیرسازه‌ای (نرم) تقسیم می‌شوند. مدیریت ریسک سیلاب نیازمند سیستم‌های پشتیبان‌دهی است که توسط ترکیب فعالیت‌های تکمیلی فردی و سازمانی مثل ایجاد و حفظ همکاری بین فعالیت‌های شهری، حفاظت سیلاب و توسعه‌های اقتصادی حاصل می‌شود. طوفان سندی در ایالات متحده آمریکا گستره‌ی جدیدی از خلاقیت‌ها، ابزارها و سیاست‌گذاری‌ها را در پی داشته است. بطوری که رقابت بازسازی طراحی شده (Rebuild by Design, 2014) متشکل از متخصصین حوزه‌های مختلف از جمله متخصصین هیدرولوژی، علوم اقتصادی و علوم اجتماعی و مهندسی معماری در این منطقه شکل گرفته است. در مقاله حاضر سعی بر آن شده است که ایده‌پردازی‌های صورت گرفته در انتخاب بهترین راه کارهای مدیریتی در رقابت بازسازی طراحی شده، در قالب تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره قابل پیاده‌سازی در مناطق سیل‌خیز باشد.

کیفیت استراتژی‌های کنترل سیلاب و نتایجی که از اعمال آن‌ها به دست می‌آید همگی تابع کیفیت تصمیم‌گیری است. در اکثر موارد تصمیم‌گیری‌ها وقتی مطلوب است که براساس چندین معیار کمی و کیفی مورد بررسی قرار گرفته باشد. به منظور کاهش خطرات و تلفات اقتصادی و جانی ابزار جامعی برای برنامه‌های کنترل سیلاب نیاز است. (Chen et al. (2011) با توسعه یک ساختار از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP¹⁸) به تعیین مناسب‌ترین گزینه برای تحلیل ریسک سیلاب پرداختند. آن‌ها در این تحقیق یک شاخص معنی‌دار ریسک سیلاب برای نقاط محتمل آب‌گرفتگی توسط دو واقعه‌ی شکست سیستم زهکشی و شکست دایک تعریف کردند. سپس با طراحی

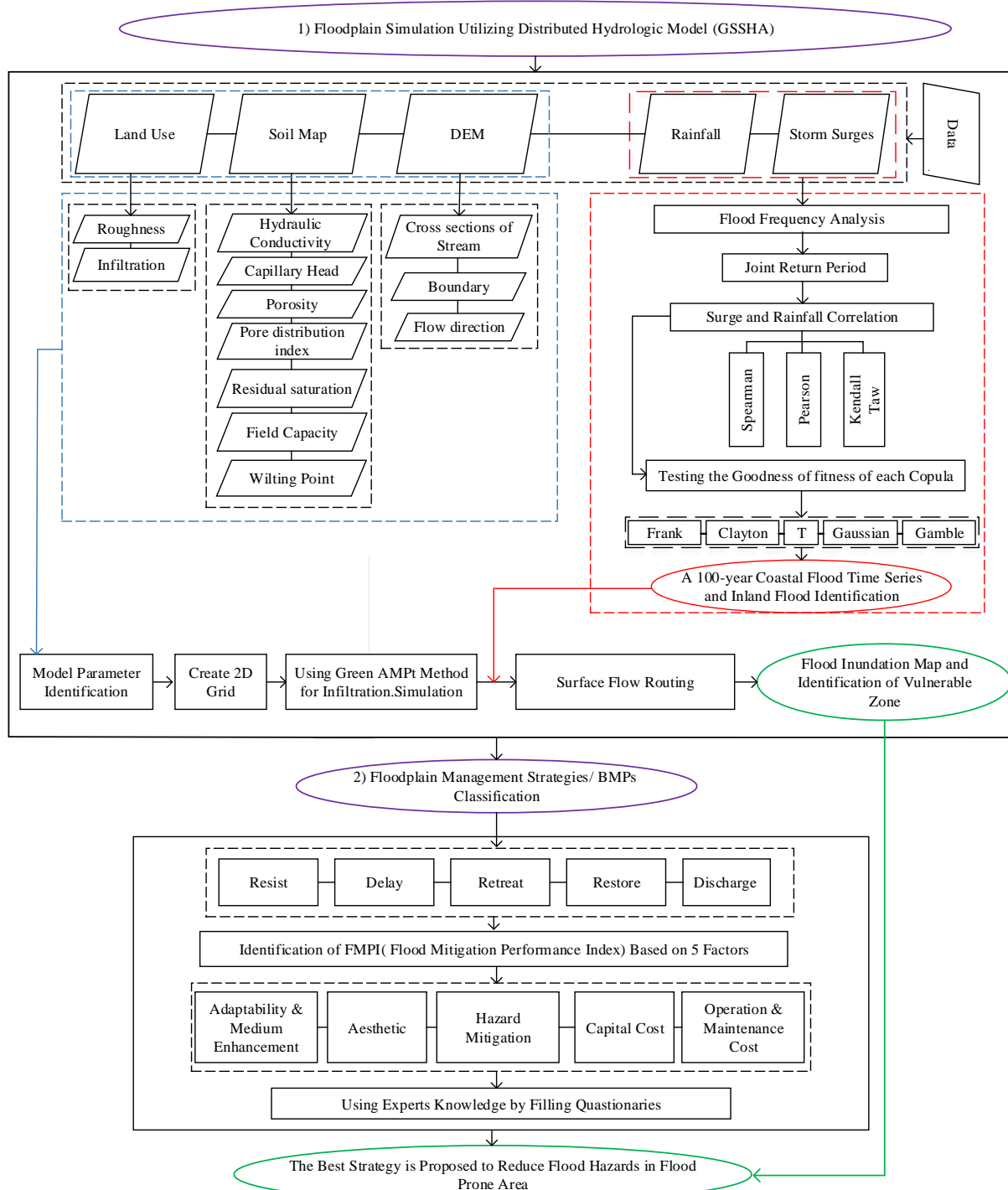


Fig. 1- A framework to evaluate flood control strategies
 شکل ۱- چهارچوب ارائه شده به منظور ارزیابی استراتژی‌های کنترل سیلاب

طوفانی است. هر چه قدر مطلق این ضریب به یک نزدیک‌تر باشد دو پدیده از هم‌بستگی بیشتری برخوردارند و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد وابستگی کمتری وجود دارد. علامت این ضریب جهت ارتباط بین دو پدیده را معین می‌نماید. سپس به منظور تعیین توابع توزیع توأم آن تجمعی $F(u,v)$ برای ارتفاع امواج طوفانی (U) و بارش (V) دارای

برخلاف مدل‌های دیگر، کاپولا توانایی توصیف وابستگی‌های غیرخطی بین متغیرها را نیز دارد. بدین منظور ابتدا هم‌بستگی بین داده‌های بارش و امواج طوفانی توسط سه آزمون اسپیرمن، کندال تاو و پیرسون تعیین می‌شود. مقدار ضریب هم‌بستگی همواره بین ۱ و -۱ بوده که نشان‌دهنده جهت و شدت وابستگی مقادیر بارش و امواج

متغیره متشکل از بارش و امواج طوفانی است. دوره بازگشت همزمان دو متغیر به دو طریق قابل تعریف است (Shiau, 2006).

(۱) دوره بازگشت توأم عطفی $T_{X,Y}^n$ که در آن هر دوی متغیرهای تصادفی X (مثلا امواج طوفانی) و Y (مثلا بارش) از حدود آستانه x, y بیشتر می‌شود و از رابطه ۳ بدست می‌آید:

$$T_{x,y}^n = \frac{\mu}{P(X > x \cap Y > y)} \quad (3)$$

$$= \frac{\mu}{1 - F(x) - F(y) + C(F(x), F(y))}$$

(۲) دوره بازگشت توأم فصلی $T'_{X,Y}$ که در آن یکی از متغیرهای تصادفی Y, X از حدود آستانه x, y بیشتر می‌شود و از رابطه ۴ بدست می‌آید:

$$T'_{x,y} = \frac{\mu}{P(X > x \cup Y > y)} \quad (4)$$

$$= \frac{\mu}{1 - C(F(x), F(y))}$$

که در آن $C(F(x), F(y)) = P(X \leq x \cap Y \leq y)$ و μ متوسط زمان بین مشاهده متوالی بر حسب سال می‌باشد. در مطالعات سیلاب آنالیزهای فراوانی بر روی سری زمانی سالانه ماکزیمم صورت می‌پذیرد، بنابراین μ برابر یک می‌باشد.

مدل‌سازی توزیعی واقعه سیلاب و روندیابی آن در طول زمان مسأله مهمی در پهنه‌بندی سیلاب است. GSSHA یک مدل بارش رواناب بر پایه GIS بوده که قابلیت روندیابی سیلاب ساحلی را داراست. این مدل آنالیز مکانی و زمانی را در فرمت رستری، که به هر سلول داده‌های رقوم ارتفاعی، کاربری اراضی و خصوصیات خاک را نسبت می‌دهد، امکان‌پذیر می‌نماید. GSSHA یکی از ماژول‌های تعریف‌شده در نرم‌افزار WMS است که توسط مرکز تحقیقات و توسعه‌ی ارتش آمریکا (USACE²¹) توسعه داده شده است. مدل‌سازی توزیعی در GSSHA شامل آنالیزهای هیدرولیکی و هیدرولوژیکی است.

توابع توزیع حاشیه‌ای به ترتیب برابر با $F_u(U) = u$ و $F_v(V) = v$ مطابق با رابطه ۱ عمل می‌شود، که در آن C نشان‌دهنده تابع توأمان است. از میان توابع توزیع توأمان مختلف، توابع جدول ۱ مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

توابع مفصل فرانک، کلایتون و گاوسین زیرمجموعه‌ی تابع توأمان ارشمیدسی هستند. تابع توأمان t بر اساس توزیع Student تابع توأمان گاوسین از توزیع چند متغیره‌ی نرمال به دست می‌آید که به علت سادگی یکی از پرکاربردترین توابع توأمان است:

$$F(u, v) = C[F_u(U), F_v(V)] \quad (1)$$

θ ، پارامتر هر یک از توابع توأمان یاد شده، با استفاده از روش حداکثر درست‌نمایی بدست می‌آید. به ازای مقادیر مختلف پارامتر θ ، پارامتری انتخاب می‌شود که رابطه ۲ را حداکثر نماید:

$$l(\theta) = \sum_{i=1}^n \log[C_\theta(F_u(U), F_v(V))] \quad (2)$$

سپس با استفاده از آزمون‌های کلموگروف اسمیرنوف و آزمون خطای ریشه حداقل مربعات (RMSE²⁰) بهترین تابع توأمان تعیین می‌گردد و در محاسبه دوره بازگشت توأمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به رابطه ۳ آماره آزمون کلموگروف اسمیرنوف می‌بایستی از D_α کمتر باشد. D_α آماره حدی آزمون K-S برای سطح پذیرش α می‌باشد و از جدول 8.A2 بر اساس مرجع Karamouz et al., (2012) به دست می‌آید. در نهایت توزیعی که شرط آزمون K-S را ارضا نماید و کمترین میزان RMSE را داشته باشد به عنوان توزیع برتر انتخاب می‌شود.

دوره بازگشت یک پدیده برابر با تعداد سال‌هایی (یا هر بازه زمانی دیگر) است که به طور متوسط بین وقوع دو پدیده وجود دارد. دوره بازگشت به عنوان یک معیار در طراحی هیدرولیکی سازه‌ها به شمار می‌رود و تابعی از زمان وقوع بین دو پدیده (μ) و تابع توزیع فراوانی تجمعی است. سیلاب در این تحقیق فرض می‌شود که یک واقعه دو

Table 1- Copula joint distribution functions

جدول ۱- توابع توزیع توأمان کاپولا

Distribution	Cumulative Distribution Function	Parameters
Frank	$C_\theta(u, v) = -\frac{1}{\theta} \log[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1}]$	$\theta \in R$
Clayton	$C_\theta(u, v) = \max[u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1, 0]^{-\frac{1}{\theta}}$	$\theta \in (0, \infty)$
Gumbel	$C_\theta(u, v) = e^{\{-[-(\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta]^{\frac{1}{\theta}}\}}$	$\theta \in [1, \infty)$
Student's t	$C_{v,p}(u_1, \dots, u_n) = t_{v,p}^n(t_v^{-1}(u_1), \dots, t_v^{-1}(u_n))$	$\theta \in (-1, 1)$
Gaussian	$C_p(u_1, \dots, u_n) = F_p^n(F^{-1}(u_1), \dots, F^{-1}(u_n))$	$\theta \in (-1, 1)$

به منظور انتخاب استراتژی مناسب از میان گروه‌های یاد شده و برآورده‌سازی انتظارات قبل و بعد از سیلاب، یک شاخص عملکرد کاهش سیلاب^{۲۶} (FMPI) بر اساس پنج فاکتور در برگیرنده خصوصیات اصلی زیرساخت‌های کنترل سیلاب، معرفی شده است (Karamouz et al., 2018). این فاکتورها شامل درجه کاهش خطر سیلاب، هزینه‌های اولیه و ساخت، هزینه‌های نگهداری و عملیاتی، تأمین سازگاری (برقراری ارتباط بین محیط زیست آبی و شهری) و حفظ زیبایی (چشم‌انداز زیبا و فضای جذب‌کننده توریست) بوده است. ابتدا فاکتورها با نظر متخصصین از جمله متخصص ساکن در منطقه مورد مطالعه در هنگام طوفان سندی، تعدادی از دانشجویان مقطع کارشناسی ارشد، دکتری و پسا دکتری که با منطقه مورد مطالعه در شهر نیویورک آشنا هستند، مقایسه زوجی می‌شوند. با بکارگیری روش AHP، از شاخه‌ی روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^{۲۷} (MCDM)، وزن هر یک از فاکتورها مشخص می‌شود. سپس هر یک از گروه استراتژی‌ها به صورت دو به دو در هر یک از فاکتورها مقایسه می‌شوند و امتیاز کسب می‌کنند. در انتها، امتیاز کسب شده در هر مرحله برای هر استراتژی در وزن فاکتور مربوطه ضرب شده و با هم جمع می‌گردند. طبق توضیحات اشاره شده شاخص عملکرد برای استراتژی i ، توسط رابطه 5 محاسبه می‌شود. در آن a_{ij} امتیاز کسب شده توسط استراتژی i در فاکتور j ، W_j وزن فاکتور j و n تعداد فاکتورها است:

$$FMPI_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} W_j \quad (5)$$

درجه ثبات تصمیم‌گیری متخصصین توسط روابط ۶ و ۷ اندازه‌گیری می‌شود. در صورتی که میزان ناسازگاری کمتر یا مساوی ۱۰ درصد باشد، تصمیم‌گیری از ثبات لازم برخوردار بوده است. I.I نشانگر شاخص ثبات تصمیم‌گیری، λ_{max} مقدار ویژه (Eigen-value) و I.R. نرخ ثبات تصمیم‌گیری هستند.

$$I.I = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

$$I.R = \frac{I.I}{1.98 (n - 2/n)} \quad (7)$$

۳-۲- مطالعه موردی

شهر نیویورک پرجمعیت‌ترین شهر ایالت نیویورک واقع در ایالات متحده آمریکا بوده که شامل پنج بخش برانکس، بروکلین^{۲۸}، منهتن^{۲۹}، کوینز^{۳۰} و استیتن آیلند^{۳۱} است. آسیب‌پذیری این شهر به علت مجاورت با پهنه‌های آبی و وقوع سیلاب‌های طوفانی بسیار بالاست. حوضه رودخانه برانکس در منطقه برانکس واقع در شهر نیویورک به عنوان منطقه مورد مطالعه این تحقیق برگزیده شده است. برانکس شمالی‌ترین بخش شهر نیویورک است. این منطقه ۱۵۰ کیلومتر مربع

اساس مدل‌سازی در این روش بدین صورت است که ابتدا با استفاده از داده‌های فیزیکی، شامل نقشه خاک^{۳۲}، رقوم ارتفاعی مدل^{۳۳}، نقشه‌های کاربری اراضی^{۳۴} و مقاطع عرضی رودخانه خصوصیات فیزیکی منطقه مورد مطالعه به مدل معرفی می‌شود. با توجه به توپوگرافی منطقه مرز حوضه، محل آبراهه‌ها و جهت جریان تعیین می‌گردد. سپس با معرفی داده‌های هیدرولوژیکی از جمله سری زمانی سطح آب و دبی پایه رودخانه و میزان تجمع بارش روزانه، با استفاده از حل معادلات پیوستگی و ممنتوم روندیابی یک بعدی در کانال و دوبعدی در جریان سطحی انجام می‌شود. ارتفاع سطح آب در زمان طوفان از مجموع امواج طوفانی و تراز جزر و مدی به دست می‌آید. تراز مبدأ قائم، سطحی با ارتفاع قراردادی صفر بوده که ارتفاع نقاط مختلف به منظور یکسان‌سازی مختصات نسبت به آن سنجیده می‌شود. در این تحقیق، تراز مبدأ NAVD88^{۲۵} که مربوط به تراز قائم شمال آمریکا است، برای تمامی رقوم ارتفاعی از جمله سطح آب و ارتفاع خشکی انتخاب می‌شود. در نهایت پهنه آبرفتگی سیلاب و ارتفاع آب در نقاط مختلف منطقه مورد مطالعه به دست می‌آید.

۲-۲- تقسیم‌بندی و ارزیابی استراتژی‌های سازگار کنترل مخاطره سیل

راه کارهای سازگار کنترل سیلاب و BMPs توسط (RBD 2014a) به ۴ گروه تأخیر، تخلیه، ذخیره و مقاومت تقسیم شده‌اند. در این تحقیق گروه پنجم به نام عقب‌نشینی، معرفی شده است. این گروه شامل عقب‌نشینی مدیریت شده (Managed retreat) بوده که در نواحی ساحلی که قبلاً در معرض سیلاب نبودند اجازه می‌دهد که توسط سیلاب، آب گرفته شوند. این روش به افزایش سازگاری و اتکا بر پاسخ طبیعی ساحل نسبت به سیلاب تأکید دارد. گروه مقاومت شامل راه کارهای سازه‌ای حفاظت سیلاب از جمله دیوار ساحلی و تورسنگ (گابیون) بوده که توسط راه کارهای سبز (پوشش گیاهی) اثرات مستقیم سیلاب و امواج طوفانی را در کنار افزایش سازگاری و حفظ چشم‌انداز طبیعی، کاهش می‌دهد. استراتژی‌های تخلیه سعی در کاهش مقدار پیک رواناب توسط افزایش مدت زمان هیدروگراف سیل دارند. پارکینگ‌ها، گودال‌های زیستی (Bioswale) و سقف‌های با پوشش گیاهی مثال‌هایی از این دست هستند. استراتژی‌های ذخیره شامل تالاب‌های مصنوعی و مخازن بوده که رواناب اضافی را از زیرساخت‌های بحرانی دور می‌سازند. استراتژی‌های تخلیه به منظور منحرف‌سازی آب انباشته شده ناشی از سیلاب در نواحی داخلی شهر ساحلی به نواحی ذخیره یا آب آزاد احداث می‌شوند که شامل پمپ‌ها، مسیرهای زهکشی و کانال‌های مصنوعی هستند.

۴-۲- جمع‌آوری اطلاعات

اطلاعات مربوط به ارتفاع امواج طوفانی و میزان بارش تجمعی روزانه در طول دوران ثبت اطلاعات توسط ایستگاه‌های هیدرولوژیکی برای تعریف سناریوهای محتمل سیلاب استفاده شده‌اند. به منظور افزایش صحت و دقت تحلیل توأمان بارش و امواج طوفانی به تعداد زیادی از داده‌های ثبت شده مشاهداتی نیاز است. از این رو در این مقاله از ترکیب دو ایستگاه ثبت اطلاعات سطح آب به منظور جبران کمبود سال‌های ثبت اطلاعات امواج طوفانی در نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. ایستگاه Willets Point از سال ۱۹۴۶ تا سال ۲۰۰۰ داده‌های سطح آب را ثبت نموده است و برای تکمیل اطلاعات از داده‌های سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۷ ایستگاه Kings point برداشت شده است. همچنین اطلاعات مربوط به دبی جریان یافته در رودخانه متعلق به ایستگاه Bronx River at Botanical Garden از سایت USGS برگرفته شده است. داده‌های تاریخی بارش مربوط به نزدیک‌ترین و کامل‌ترین ایستگاه ثبت بارش به منطقه مورد مطالعه، Westchester Co Airport، از سایت مرکز ملی داده آب و هوا برداشت شده است. در جدول ۲ مشخصات ایستگاه‌های سطح آب، بارش و دبی ذکر شده است.

از نقشه‌های کاربری اراضی شامل مناطق مسکونی، تجاری، صنعتی، تفریحی و سایر زیرساخت‌ها به منظور محاسبه حجم رواناب استفاده می‌شود که از مسیر <http://www.nyc.gov/html/dcp/html/bytes/applbyte.shtml> دریافت شده‌اند. اطلاعات دیگری که برای معرفی مشخصات نفوذپذیری و توپوگرافی لازم است، نقشه‌های خاک و رقم ارتفاعی مدل بوده که به ترتیب از <http://datagateway.nrcs.usde.gov> قابل دسترسی هستند. پارامترهای مربوط به خصوصیات خاک گاهی در نقاط نزدیک به مرز حوضه مورد مطالعه ناقص بوده است، از این رو مقادیر این پارامترها برابر با مقادیر نقاط مجاورشان در نظر گرفته شده است.

مساحت دارد، که ۱۱۰ کیلومتر مربع آن خشکی و ۴۰ کیلومتر مربع آن زیر آب است و توسط رودخانه برانکس به یک بخش پر تپه در غرب، نزدیک به منهتن، و یک بخش مسطح در شرق، نزدیک به لانگ آیلند تقسیم شده است. رودخانه برانکس از وستچستر^{۳۲} سرچشمه می‌گیرد و به سمت جنوب جریان دارد و با گذر از منطقه برانکس با طولی حدود ۳۹ کیلومتر به رودخانه ایست می‌ریزد. این رودخانه به عنوان تنها رودخانه آب شیرین شهر نیویورک به شمار می‌آید. شکل ۲ حوضه برانکس و محل ایستگاه‌های هیدرومتری این منطقه را نشان می‌دهد. هدف از انتخاب حوضه برانکس در ایالات متحده آمریکا به عنوان مطالعه موردی، تعیین و توسعه روش کار بر مبنای اطلاعات در دسترس این منطقه بوده است. روش‌های تهیه شده با جمع‌آوری اطلاعات مشابه در ایران قابل اجرا خواهد بود.

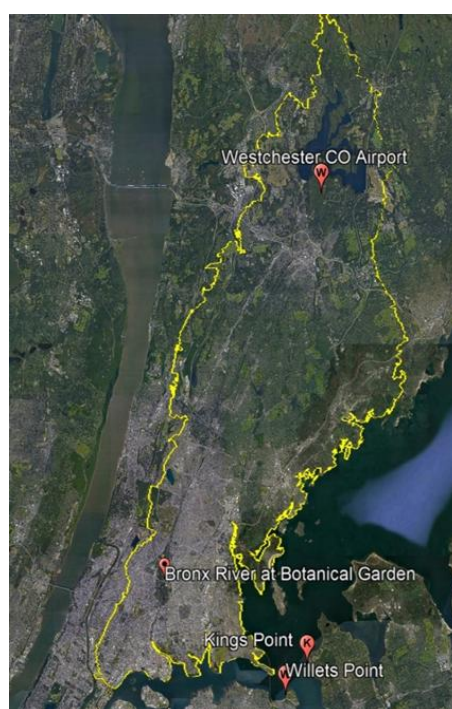


Fig. 2- Bronx River Watershed in New York City
شکل ۲- حوضه رودخانه برانکس در شهر نیویورک

Table 2- Characteristics of discharge, and sea level stations used for the study watershed
جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های سطح آب و دبی مورد استفاده برای منطقه مورد مطالعه

Station Name	Latitude	Longitude	Elevation (m)	Data	Record Period	Source
Willets Point	40°47'36"	73°46'54"	0	Storm Surges	1946-2000	NOAA(2017a)
Kings point	40°48'36"	73°45'54"	0	Storm Surges	1998-2017	NOAA(2017b)
Westchester Co.	41°4'0.98"	73°45'12.28"	115.5	Rainfall	1946-2017	NOAA(2017c)
Bronx River at Botanical Garden	40°51'44.3"	73°52'27.8"	15.24	Discharge	2006-2017	USGS(2017)

است. مقدار حداکثر قابل قبول آماره K-S برای سطح معنی داری ۰/۰۵ و تعداد ۷۲ داده مشاهداتی در این تحقیق طبق (Karamouz et al. (2012 برابر با ۰/۱۴۲ است و آماره محاسبه شده در هر پنج تابع از این مقدار کمتر است. بنابراین از منظر آزمون K-S تمام توابع قابل قبول هستند. در نتیجه تابع توأمان فرانک با کمترین میزان RMSE، به عنوان تابع توزیع برتر انتخاب شده است. لازم به ذکر است به دلیل نزدیکی نتایج RMSE می توان از توزیع گامبل نیز استفاده کرد.

یک سیلاب ترکیبی با دوره بازگشت مشخص از وقوع همزمان مقادیر متفاوتی از ارتفاع موج و میزان بارش جمعی روزانه تشکیل شده است. به عبارتی دیگر دو ارتفاع موج متفاوت در ترکیب جداگانه با دو مقدار بارش جمعی روزانه متفاوت ممکن است دوره بازگشت یکسانی داشته باشند. از این رو خطوط هم‌مقیاس نشان دهنده دوره بازگشت‌های مختلف هستند. این خطوط نشان‌دهنده تمام زوج مرتب‌های بارش و امواج طوفانی در گستره داده‌های مشاهداتی هستند که وقوع توأمان آن‌ها دوره بازگشت یکسانی دارد. به منظور تعیین دسته داده‌های بارش و امواج طوفانی متناسب با هریک از دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ ساله، تعداد هزار داده در گستره داده‌های بارش (محور عمودی) و هزار داده در گستره داده‌های امواج طوفانی (محور افقی) تولید گردیده است. سپس با استفاده از تابع توزیع برتر فرانک دوره بازگشت توأمان برای یک میلیون ترکیب ایجاد شده از داده‌های تولیدی به صورت خطوط هم‌مقیاس در شکل ۴ تعیین گردیده است. در واقع هر خط هم‌مقیاس زوج مرتبی از داده‌های بارش و امواج طوفانی را نشان می‌دهد که دوره بازگشت وقوع همزمان آن‌ها متناسب با عدد درج شده در کنار آن خط است.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

۳-۱- تحلیل فرکانس داده‌های هیدرولوژیکی و شبیه‌سازی پهنه سیلاب با استفاده از مدل توزیعی هیدرولوژیکی

هم‌بستگی وقایع حدی بارش و امواج طوفانی رخ داده در منطقه مورد مطالعه با تعیین ضریب هم‌بستگی اسپیرمن، کندال تاو و پیرسون بررسی شده است. برتری استفاده از روش اسپیرمن و کندال تاو نسبت به روش پیرسون در این است که اگر یک یا چند داده نسبت به سایر اعداد بسیار بزرگ باشد (همانطور که در شکل ۳ بزرگی طوفان سندی نشان داده شده است) چون تنها رتبه آن‌ها محسوب می‌شود، سایر داده‌ها و میزان ضریب هم‌بستگی تحت‌الشعاع قرار نمی‌گیرند. در شکل ۳ به صورت شماتیک و در جدول ۳ مقادیر ضرایب هم‌بستگی محاسبه شده مشاهده می‌شود.

Table 3- Correlation parameters of storm surge and rainfall data

جدول ۳- ضرایب هم‌بستگی داده‌های بارش و امواج

	طوفانی بین داده‌ها		
	Kendal-Tau	Pearson	Spearman
Correlation Coefficients	0.081	0.004	0.128

سپس پنج تابع توأمان کلاپتون، گامبل، تی، فرانک و گاوسین برای برآورد توزیع احتمال توأمان استفاده شده است. در تعیین پارامترهای تابع توأمان از روش لگاریتم درست‌نمایی استفاده شده است؛ در حقیقت مقداری که عبارت لگاریتم درست‌نمایی را بیشینه نماید به عنوان پارامتر آن تابع معرفی شده است. برای تعیین بهترین تابع توأمان از آزمون RMSE و کلموگروف اسمیرنوف استفاده شده است. مقادیر پارامتر هر یک از توابع مفصل و آماره‌های آزمون در جدول ۴ آمده

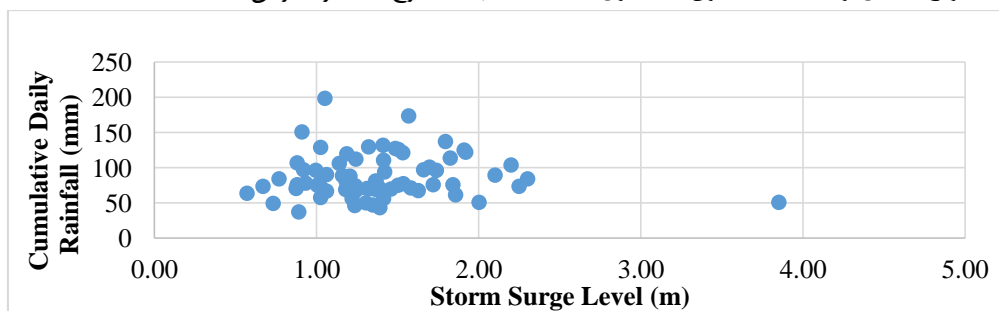


Fig. 3- Historical joint occurrence of storm surge and rainfall data for 1946-2017
 شکل ۳- داده‌های بارش و امواج طوفانی همزمان رخ داده در منطقه از سال ۱۹۴۶ تا ۲۰۱۷

Table 4- Parameters of copula functions

جدول ۴- پارامترهای توابع توأمان

Functions	Student's t	Frank	Gumbel	Gaussian	Clayton
Parameters	0.1311	0.8345	1.0412	0.0067	0.2648
K-S	0.07941	0.0749	0.0886	0.0964	0.0731
RMSE	0.0336	0.0331	0.036	0.0394	0.0353

سری زمانی امواج طوفانی با تراز جزرو مدی در زمان طوفان آیرن جمع شده و سری زمانی سطح آب سیلاب ساحلی ۱۰۰ ساله مطابق شکل ۵ به دست آمده است. سری زمانی سیلاب ساحلی و میزان بارش تجمعی روزانه به مدل توزیعی هیدرولوژیکی فراخوانی شده و مطابق شکل ۶ پهنه سیلاب ۱۰۰ ساله ترکیبی به دست آمده است. به دلیل حضور فعالیت‌های صنعتی از جمله تصفیه‌خانه Hunts point تمرکز مسأله بر مناطق ساحلی جنوب برانکس بوده است. عمق آب گرفتگی در این ناحیه بر اثر سیلاب ساحلی و درون شهری به ۳ متر می‌رسد و نیاز به ارائه راه‌کاری در بهبود عملکرد این زیرساخت در هنگام وقوع سیلاب ضروری است که در قسمت بعدی به آن پرداخته شده است.

۳-۲- ارزیابی استراتژی‌های سازگار کنترل مخاطره سیل

به منظور تعیین شاخص عملکرد برای هر یک از استراتژی‌های مقاومت، تخلیه، ذخیره، تاخیر و عقب‌نشینی پنج فاکتور شامل هزینه‌های اولیه، درجه سازگاری با محیط زیست، هزینه‌های عملکرد و نگهداری، درجه زیبایی و میزان کاهش بار سیلاب وارده تعریف شده است.

نقاط به شکل ضربدر در شکل ۴، داده‌های مشاهداتی در طی ۷۲ سال در منطقه مورد مطالعه می‌باشند که دوره بازگشت توأمان آن‌ها در دو حالت عطفی و فصلی تعیین شده است. به عنوان مثال واقعه سندی با ارتفاع حداکثر موج طوفانی ۳/۸۶ متر و بارش تجمعی روزانه ۵۰ میلی‌متر در حالت عطفی دوره بازگشتی برابر با ۱۵۰ سال را داراست. در مقابل در حالتی که دوره بازگشت توأمان فصلی مورد نظر باشد، واقعه سندی دیگر یک طوفان شدید به‌شمار نمی‌آید، زیرا بارش رخ داده در این زمان چشم‌گیر نبوده است. در این تحقیق شبیه‌سازی سیلاب ۱۰۰ ساله توأمان در منطقه برانکس مدنظر است. بنابراین با توجه به شکل ۴ زوج مرتبی از بارش و امواج طوفانی، نزدیک به وقایع رخ داده در منطقه، یعنی ارتفاع موج ۲/۵ متر و میزان بارش روزانه تجمعی ۸۰ میلیمتر به عنوان سیلاب ترکیبی ۱۰۰ ساله انتخاب شده است.

به منظور تعیین هیدروگراف طوفان ساحلی ۱۰۰ ساله از سری زمانی طوفان مرجع آیرن استفاده شد، به صورتی که حداکثر ارتفاع موج در زمان این طوفان به طوفان ۱۰۰ ساله تبدیل گشته و تمامی نقاط هیدروگراف سیل آیرن نیز به همین نسبت افزایش یافته‌است. در نهایت

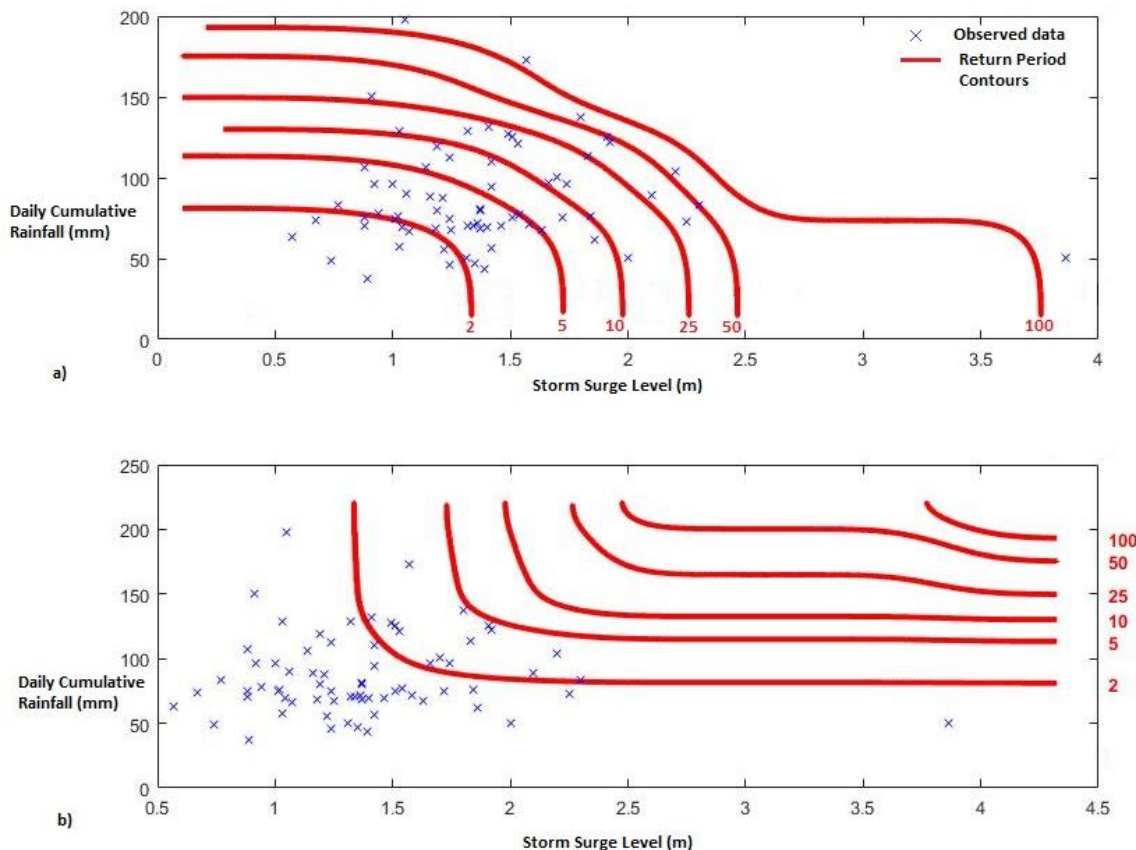


Fig. 4- Joint return periods' contours of storm surge and rainfall data using Frank distribution a) "and" b) "or" situation

شکل ۴- دسته داده‌های سطح آب و بارش در دوره بازگشت‌های مختلف در حالت الف) عطفی ب) فصلی با استفاده از توزیع فرانک

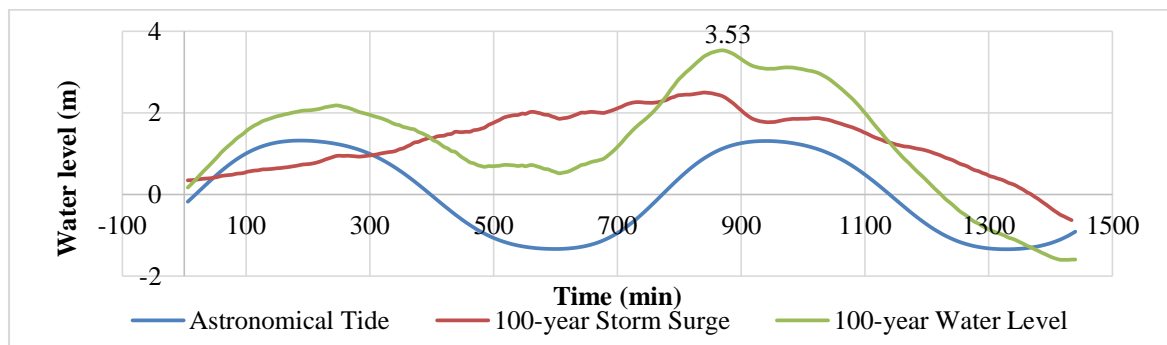


Fig. 5- A 100-year Water level Time Series

شکل ۵- سری زمانی سطح آب سیلاب ۱۰۰ ساله

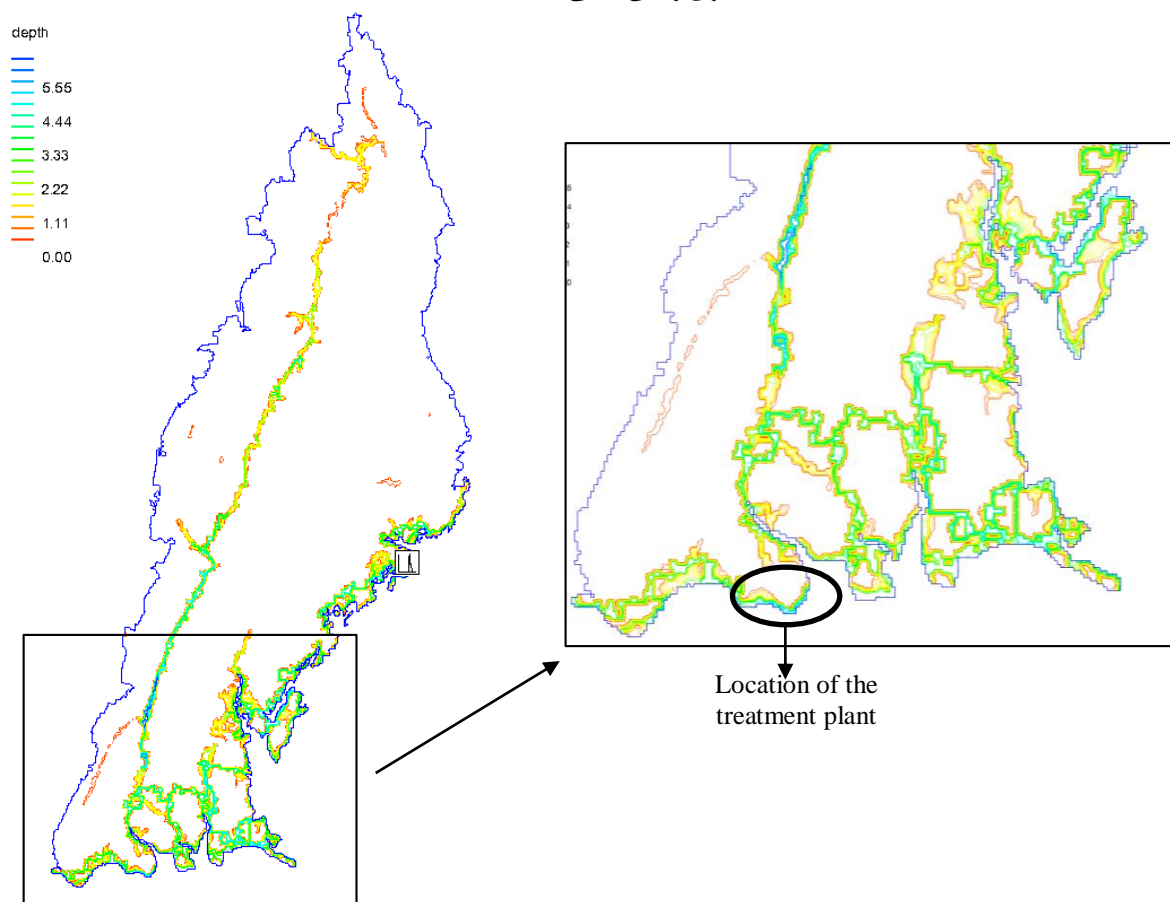


Fig. 6- 100-year flood plain based on Irene storm surge

شکل ۶- پهنه‌بندی سیلاب ۱۰۰ ساله بر اساس طوفان ایرن

بین محیط زیست و جامعه شهری بوده است. علاوه بر این حفظ چشم‌انداز زیبا و طبیعی در محیط زندگی شهری فاکتور سومی است که در طراحی سازه‌های حفاظت سیلاب می‌بایستی تأمین شود. برآورده‌سازی مسائل گفته شده هزینه‌های ساخت، نگهداری و عملکرد را توجیه می‌کند بنابراین دو فاکتور اخیر از درجه اهمیت کمتری برخوردار هستند.

وزن هر یک از معیارها با استفاده از مقایسه دو به دو AHP و قضاوت مهندسی مطابق با شکل ۷ به‌دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد میزان کاهش بار سیلاب وارده از نظر متخصصین از اهمیت بالاتری نسبت به بقیه فاکتورها برخوردار بوده که نشان از تمایل متعصبانه و قدیمی در این موضوع است که سازه‌های صرفاً تدافعی بالاترین اثر در کاهش اثرات سیلاب را دارا هستند. در درجه دوم تأمین سازگاری اهمیت بالایی داشته و این به علت تمایل متخصصین در حفظ ارتباط

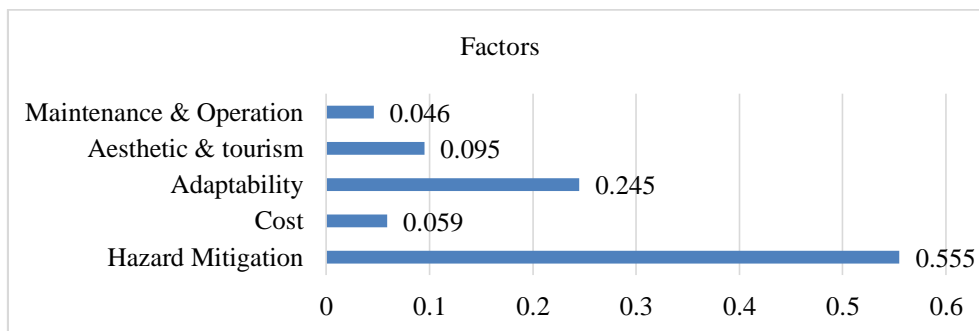


Fig. 7- Factors' Weight
شکل ۷- وزن معیارها

تمایل طبیعی ساحل در مقاومت در برابر سیلاب است. این موضوع می‌تواند دلیل خوبی برای مطلوبیت بالای استراتژی عقب‌نشینی در فاکتور درجه سازگاری نیز باشد.

در نهایت شاخص عملکرد برای هر استراتژی مطابق شکل ۸، توسط ضرب مقادیر بدست آمده از مقایسه دو به دو استراتژی‌ها در هر یک از فاکتورها، در وزن فاکتورها و جمع آن‌ها به دست آمده است. استراتژی مقاومت بالاترین مقدار را دارا است و به همین علت به عنوان روش برتر انتخاب شده است. از میان راه‌کارهای متعلق به این دسته، لوی‌های چندهدفه^{۳۳} پیشنهاد می‌شود که دارای خصوصیت مقاومتی همچون دیوارهای ساحلی در کاهش اثرات مخرب سیلاب هستند. همچنین می‌توانند فضای مناسبی برای فعالیت‌های عمومی همچون فضای پیاده روی فراهم نمایند و با توسعه پوشش گیاهی بر بدنه‌ی آن‌ها می‌توان از افزایش سازگاری این سازه تدافعی با محیط طبیعی بهره برد.

شکل ۸ میزان مطلوبیت هر یک از استراتژی‌ها در هر یک از فاکتورها را نشان می‌دهد. در فاکتور هزینه‌ی اولیه استراتژی عقب‌نشینی بالاترین مطلوبیت را داراست که به دلیل عدم نیاز به تجهیزات خاص و فعالیت‌های مورد نیاز با هزینه‌های اولیه کمتر از بقیه استراتژی‌هاست. در فاکتور زیبایی، استراتژی تأخیر به علت تجهیزات کوچکتر و فضای اشغال‌کننده‌ی کمتر بالاترین مطلوبیت را دارا است و در مقابل استراتژی ذخیره با اشغال کردن فضای زیاد تجهیزات وابسته‌ی ناموزون خود کمترین مطلوبیت را دارد. در دسته‌ی هزینه‌های نگهداری و عملیاتی، استراتژی مقاومت به علت خصوصیات پایدار و سازه‌ی مقاوم آن دیرتر به زوال رسیده و مطلوب‌تر است. این موضوع می‌تواند هزینه‌های بالای ساخت آن را جبران نماید. در مقابل هزینه‌های نگهداری بالای استراتژی‌های عقب‌نشینی به علت در معرض مستقیم سیلاب بودن و نداشتن تجهیزات مقاوم‌کننده خاص موجب کاهش مطلوبیت در این فاکتور شده است. استراتژی مقاومت در فاکتور میزان کاهش مخاطره سیلاب بالاترین مطلوبیت را دارا است. نکته قابل توجه در این فاکتور بالا بودن استراتژی عقب‌نشینی بوده که ناشی از اتکا به

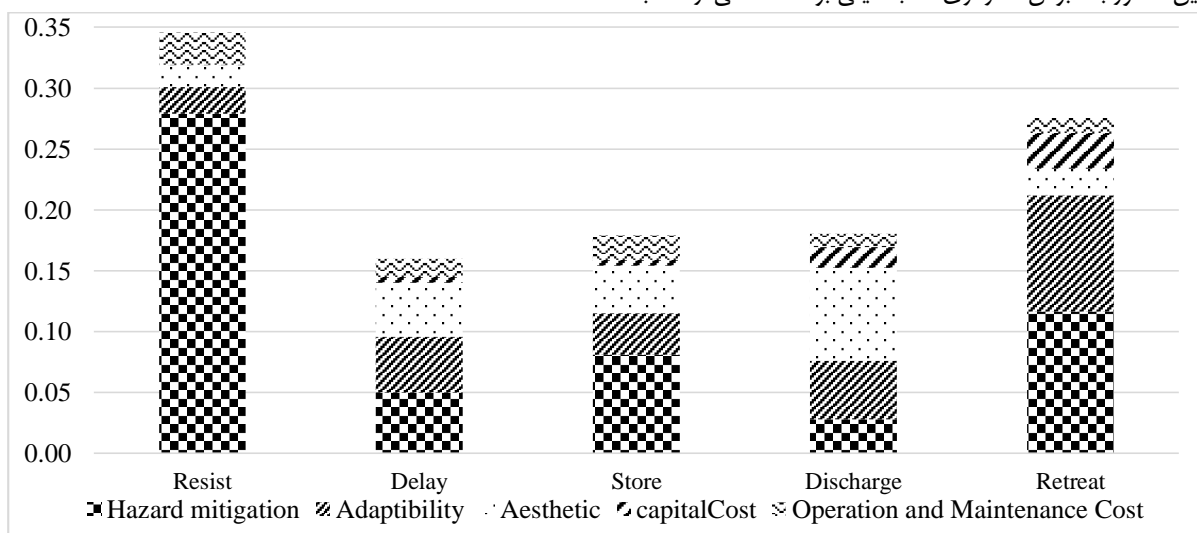


Fig. 8- FMPI Value and Strategies' Value in each Factors
شکل ۸- شاخص FMPI و میزان مطلوبیت هر یک از استراتژی‌ها در معیارها

۴- خلاصه و جمع‌بندی

مدت زمان وقوع آن به هیدروگراف بارش و یا سری زمانی امواج طوفانی مطابق با اقلیم منطقه دست یافت. با به‌دست آوردن سری زمانی امواج طوفانی با استفاده از توابع توأمان دیگر نیازی به استفاده از طوفان مرجع نیست. همچنین در شبیه‌سازی اثرات امواج طوفانی اثرات دما و حرکت جبهه‌های هوایی باد در نظر نگرفته شده است که می‌تواند در ادامه تحلیل‌های بیشتری در این بخش انجام گیرد.

۵- تشکر

بدین وسیله نویسندگان از زحمات جناب آقای دکتر محمدعلی علیایی و مشارکت علمی بسیار اثرگذار ایشان در پیش برد اهداف مقاله کمال تشکر را به عمل می‌آورند. همچنین از جناب آقای پویا خلیلی و سرکار خانم الهام ابراهیمی به جهت ارائه نظرات گرانبهایشان در نگارش مقاله تشکر و قدردانی می‌گردد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Watershed Management System
- 2- Geographic Information Systems
- 3- Bronx
- 4- Best Management Practices
- 5- Resist
- 6- Delay
- 7- Retreat
- 8- Store
- 9- Discharge
- 10- Hazard Mitigation Degree
- 11- Aesthetic
- 12- Capital Cost
- 13- Maintenance and Operation Cost
- 14- Adaptability
- 15- Advanced Circulation
- 16- Storm Water Management Model
- 17- Gridded Surface/Subsurface Hydrologic Analysis
- 18- Analytic Hierarchy Process
- 19- Copula
- 20- Root-Mean-Square Error
- 21- U.S. Army Corps of Engineers
- 22- Soil Map
- 23- DEM
- 24- Land Use
- 25- North American Vertical Datum
- 26- Flood Mitigation Performance Index
- 27- Multi Criteria Decision Making
- 28- Brooklyn
- 29- Manhattan
- 30- Queens
- 31- Staten Island
- 32- Westchester
- 33- Multi-Purpose Levee

وقوع سیل در شهرهای ساحلی به عنوان یکی از مخرب‌ترین فجایا به شمار می‌رود. با توجه به عوامل مؤثر در وقوع سیلاب، سیلاب در این مقاله به دو گروه اصلی سیل‌های درون شهری (ناشی از بارش) و سیل‌های ساحلی (ناشی از امواج طوفانی ساحلی) تقسیم شده است. در مناطق شهری سیلاب ممکن است در اثر وقوع یک یا ترکیبی از این دو مورد رخ دهد. در این تحقیق ابتدا با استفاده از توابع توأمان شامل توابع کلایتون، گامبل، گاوسین، تی و فرانک به تحلیل فراوانی وقوع این دو پدیده هیدرولوژیکی به‌صورت هم‌زمان و تعیین دوره بازگشت توأمان در دو حالت عطفی و فصلی پرداخته شده است. نتایج حاکی از آن بوده که احتمال اینکه بارش و امواج طوفانی به طور هم‌زمان از یک حد مشخصی بیشتر باشند به مراتب کمتر از حالتی است که تنها یکی از آن‌ها این شرط را ارضا نماید. سپس سطح آب و بارش متناسب با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله ترکیبی به مدل توزیعی هیدرولوژیکی وارد گردید و پهنه سیلاب ۱۰۰ ساله به‌دست آمد. در بخش بعدی راه‌کارهای مدیریتی کنترل سیلاب با توجه به خصوصیات آن‌ها در پنج دسته تأخیر، مقاومت، تخلیه، ذخیره و عقب‌نشینی طبقه‌بندی شدند. در نهایت راه‌کارها براساس پنج معیار هزینه ساخت، هزینه نگهداری و بهره‌برداری، زیبایی، سازگاری و میزان کاهش خطر با بکارگیری نظر متخصصین و تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندهدفه ارزیابی شده و گزینه پیشنهادی در کاهش آسیب‌پذیری منطقه مورد مطالعه ارائه گشته است. مطالعه موردی انتخاب شده جهت نشان دادن کارایی روش‌های تدوین شده در این مقاله است. روش کار ارائه شده به منطقه مورد مطالعه وابسته نبوده و قابل استفاده و کاربردی در مناطق ساحلی شمال کشور ایران می‌باشد. این مقاله با ارائه راه‌کاری در تحلیل توأمان پدیده‌های بارش و امواج طوفانی و تهیه نقشه‌های سیلاب می‌تواند به عنوان مبنایی در تعیین نقشه‌های خطرپذیری این مناطق و ارائه نقشه‌های تخلیه سکنه در هنگام یا پیش از وقوع خطر مورد استفاده قرار گیرد. ارزیابی راه‌کارهای مدیریتی قابل تعمیم به تمامی مناطق بوده و با جمع‌آوری اطلاعات در کشور قابل استفاده می‌باشد. به منظور ارائه پیشنهاداتی در جهت ادامه کار انجام شده، در ادامه به مواردی اشاره خواهد شد. در تحلیل داده‌های سیلاب هم‌زمانی دو پدیده با استفاده از توابع تحلیل توأمان با دو متغیر انجام شده است. در مناطق دارای رودخانه دبی جریان در زمان سیلاب می‌تواند به عنوان متغیر سوم در نظر گرفته شود و از تحلیل هم‌زمان سه متغیره برای تعیین دوره بازگشت توأمان سطح آب و بارش و دبی استفاده نمود. به علاوه، تابع توزیع توأمان برای برقراری ارتباط بین خصوصیات مختلف یک واقعه نیز قابل استفاده است. به عنوان مثال با رویکرد ارایه شده در این مقاله می‌توان با تعیین احتمال هم‌زمانی پیک بارش یا امواج طوفانی و

- Marfai MA, Sekaranom AB, & Ward P (2015) Community responses and adaptation strategies toward flood hazard in Jakarta, Indonesia. *Natural Hazards* 75(2):1127-1144
- Nguyen P, Thorstensen A, Sorooshian S, Hsu K, AghaKouchak A, Sanders B, & Smith M (2016) A high resolution coupled hydrologic-hydraulic model (HiResFlood-UCI) for flash flood modeling. *Journal of Hydrology* 541:401-420
- NOAA (2017a) Observed water levels at Willets point. Available at: <https://tidesandcurrents.noaa.gov/waterlevels.html?id=8516945> [Online]
- NOAA (2017b) Observed water levels at Kings Point. Available at: <https://tidesandcurrents.noaa.gov/waterlevels.html?id=8516945> [Online]
- NOAA (2017c) Observed rainfall data at Westchester Co. Available at: <https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/datasets/GHCND/stations/GHCND:USW00094745/detail> [Online]
- Ozhan M, Bahremand A, Sheikhi V, Komaki Ch (2018) Prediction of floods extent with different return periods using 2-d hydraulic model, LISFLOOD-FP. *Iran-Water Resources Research (In Persian)*
- Patrick L, Solecki W, Jacob KH, Kunreuther H, & Nordenson G (2015) New York city panel on climate change 2015 report chapter 3: static coastal flood mapping. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1336(1):45-55
- Rahimi L, Dehghani A, Abdolhosseini M, & Ghorbani Kh (2014) Flood frequency analysis using archimedean copula functions based on annual maximum series (case study: Arzkuh hydrometric station in Golestan province). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage (In Persian)*
- RBD (2014) Hudson river project team's proposal. Available at: <http://www.rebuildbydesign.org/data/files/673.pdf> [Online]
- Shiau JT (2006) Fitting drought duration and severity with two-dimensional copulas. *Water Resources Management* 20(5):795-815
- USGS (2017) Current/historical observations for New York. Available at: http://waterdata.usgs.gov/usa/nwis/uv?01_302020 [Online]
- Yosefi M, Ansari H, Mosaedi A, Samadi Z (2017) The relationship between three drought indices with a number of climate parameters in several climatic zones of Iran. *Iran-Water Resources Research (In Persian)*
- Bilskie MV, Hagen SC, Medeiros SC, & Passeri DL (2014) Dynamics of sea level rise and coastal flooding on a changing landscape. *Geophysical Research Letters* 41(3):927-934
- Chen YR, Yeh CH, & Yu B (2011) Integrated application of the analytic hierarchy process and the geographic information system for flood risk assessment and flood plain management in Taiwan. *Natural Hazards* 59(3):1261-1276
- Daksiya V, Su H T, Chang YH, & Lo EY (2017) Incorporating socio-economic effects and uncertain rainfall in flood mitigation decision using MCDA. *Natural Hazards* 87(1):515-531
- Downer CW, & Ogden FL (2004) GSSHA: Model to simulate diverse stream flow producing processes. *Journal of Hydrologic Engineering* 9(3):161-174
- Karamouz M, Taheri M, Khalili P, & Chen X (2019) Building Infrastructure Resilience in Coastal Flood Risk Management. *Journal of Water Resources Planning and Management* 145(4): 04019004
- Karamouz M, Razmi A, Nazif S, & Zahmatkesh Z (2017) Integration of inland and coastal storms for flood hazard assessment using a distributed hydrologic model. *Environmental Earth Sciences* 76(11):395
- Karamouz M, Zahmatkesh Z, Goharian E, & Nazif S (2014) Combined impact of inland and coastal floods: Mapping knowledge base for development of planning strategies. *Journal of Water Resources Planning and Management* 141(8):04014098
- Karamouz M, Nazif S, & Falahi M (2012) *Hydrology and hydroclimatology: Principles and applications*. CRC Press
- Khakbaz B, Imam B, Hsu K, & Sorooshian S (2012) From lumped to distributed via semi-distributed: Calibration strategies for semi-distributed hydrologic models. *Journal of Hydrology* 418:61-77
- Khalili MN, Ouarda TBMJ, Ondo JC, Gachon P, & Bobée B (2006) Frequency analysis of a sequence of dependent and/or non-stationary hydro-meteorological observations: A review. *Journal of Hydrology* 329(3-4):534-552
- Machado MJ, Botero BA, López J, Francés F, Díez-Herrero A, & Benito G (2015) Flood frequency analysis of historical flood data under stationary and non-stationary modelling. *Hydrology and Earth System Sciences* 19(6):2561